

Ultra Fine Patterning of Photoresist by Control of Plasma Radiation-induced Damage and Residual Stress

著者	小藤 直行
号	55
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	工博第4425号
URL	http://hdl.handle.net/10097/61512

	こ ふ じ な お ゆ き
氏 名	小 藤 直 行
授 与 学 位	博士 (工学)
学 位 授 与 年 月 日	平成 2 3 年 3 月 2 5 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 4 条第 1 項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) ナノメカニクス専攻
学 位 論 文 題 目	UltraFine Patterning of Photoresist by Control of Plasma Radiation-induced Damage and Residual Stress (プラズマ照射誘起損傷と残留応力の制御によるフォトレジスト 超微細加工に関する研究)
指 導 教 員	東北大学教授 三浦 英生
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 三浦 英生 東北大学教授 羽根 一博 東北大学教授 坂 真澄 東北大学教授 寒川 誠二

論 文 内 容 要 旨

半導体デバイスの超微細加工において顕在化しているフォトレジストマスクの変形の問題に対して、変形のメカニズムを解明するとともに、これまでにない新たな解決方法を提案実証した。

半導体デバイスの高集積化に伴って、その最小構成要素である MOS トランジスタのゲート寸法の微細化が進んでいる。そのうち、特に高速動作が要求される MPU (microprocessor unit) では微細化の進展が著しく、ゲート幅 50nm 以下の超微細加工が要求されている。この寸法は、リソグラフィーの露光限界より小さいため、リソグラフィーで形成されたフォトレジストマスクを、一旦、プラズマ処理で細線化 (トリミング) した後、細線化されたフォトレジストマスクでゲート材料をエッチングする方法が用いられる。しかし、ながら 45nm 以降のプロセスでは、トリミングされたフォトレジストマスクがプラズマ処理中に変形する問題が顕在化してきた。フォトレジストマスクの変形には、ウエハや周期パターンの最外周でフォトレジストマスクが一方向に倒れる distortion と呼ばれる現象と、周期パターンの内部でフォトレジストマスクが左右にジグザクに倒れる wiggling と呼ばれる現象がある。従来は、変形の形態や発生箇所、フォトレジストマスクの材料、処理条件ごとに様々なモデルが提唱されてきた。

本研究では、フォトレジストマスク変形の形態や発生箇所、材料、処理条件に依存しない普遍的な解決法の開発を目的とし、変形メカニズムの解明を行った。メカニズムの解明にあたっては、プラズマ処理中に試料に照射されるラジカルがフォトレジスト表面に形成する変質層とその応力に着目し、図 1 に示す変形のモデルを提案した。

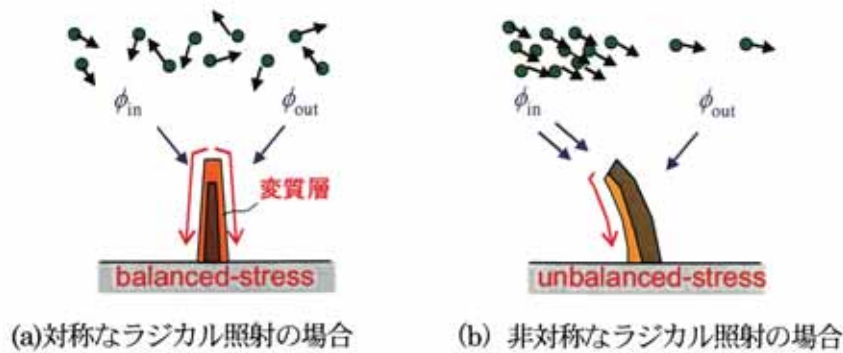


図1. ラジカル照射がつくる変質の応力に起因するフォトレジストマスクの変形のモデル。

このモデルでは、ラジカル照射によって応力を有する変質層がフォトレジスト表面に形成される。ラジカル照射量の非対称によって、変質層の厚みが非対称になり、フォトレジストマスクが変形する。

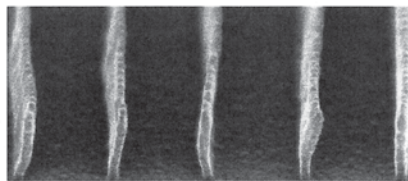
本モデルの検証のため、ラジカルを照射したフォトレジスト膜と、照射後のフォトレジストの最表面を Ar プラズマ処理で除去した試料の両者を比較分析した。X-ray photoemission spectroscopy (XPS) による最表面の化学的分析とナノインデンテーションによる深さ方向の力学的分析を行い、酸素・フッ素ラジカル照射によって、厚さ数 nm の非常に薄い変質層がフォトレジストの表面に形成されることを2種類のフォトレジストで実証した。また、ウエハ反り計測を用いて変質層の応力を計測した結果、レジスト材料によらず、変質層が数 100MPa から数 GPa の強い収縮応力を有することを実証した。また、フォトレジストマスクの片面にのみラジカルを照射する実験を行い、非対称なラジカル照射によってフォトレジストマスクが倒れることを実証した。

さらに、変質層厚みとフォトレジストマスク変形の関係を定量的に見積もるために、2次元のシミュレータを開発した。本シミュレータ中では、Deal-Grove の酸化層形成のモデル式と既存のエッチングのモデル式を組み合わせることで、変質とエッチングが同時に起きる系における変質層形成の時間変化を見積もっている。本モデルによって算出された値が定量的に実験結果と一致することを実証した。さらに、フォトレジストマスク表面のラジカル照射量を立体角から算出する既存の手法によりラジカル照射の非対称を見積もり、フォトレジスト表面の変質層厚みの分布を算出した。算出された変質層厚みの分布に基づき、2次元平面歪モデルを用いた弾性変形シミュレーションを行いフォトレジストマスク変形の見積もりを行った。この計算で予測されたマスク変形が実験結果と一致することを実証した。

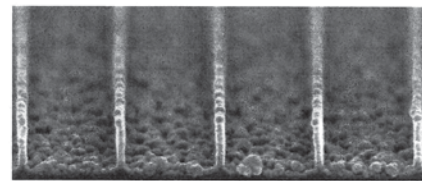
本シミュレータによる解析の結果、ウエハエッジや周期パターンの最外周で見られる distortion のメカニズムに関しては、ウエハエッジやオープンスペース側のラジカル照射量が大きくなるため、変質層厚みが非対称となり、フォトレジストマスクが片側に倒れることを解明した。また、周期パターンで見られる wiggling に関しては、スペース間隔のばらつきに起因してフォトレジストマスクの左右のラジカル照射量がばらつくため、変質層厚みにばらつきを生じ、結果的にフォトレジストマスクが左右にジグザグに倒れることを解明

した。さらに、ラジカル濃度や処理時間に対する複雑な依存性に関しても、本モデルで説明できることを明らかにした。

シミュレーションに基づき、次世代超微細加工に対応したフォトレジストマスクの変形抑制方法を開発した。計算によれば、フォトレジストマスクの変形量は、マスクの幅の3乗に反比例して急激に増大する。このため、フォトレジストマスクのヤング率を増やすという従来の改善方法は次世代以降では限界に達することがわかった。そこで、新たな変形抑制の方法として、フォトレジストマスク変形の原因である変質層を除去する方法を検討した。前述の結果から、ラジカル照射によって形成される変質層は Ar プラズマ処理で容易に除去されることがわかっている。また、変形を抑制するためには、フォトレジストマスクに生じる応力が降伏応力を超えて塑性変形する前に変質層を除去する必要がある。そこで、変質層形成を伴うエッチングのステップと、変質層を除去する Ar プラズマ処理のステップを短時間で交互に繰り返すマルチステップのエッチング提案した。最適な繰り返し周期をシミュレーションにより見積もり、実験により検証した結果、25nm プロセスの Wiggling が大幅に抑制されることを実証した (図2)。これより次世代以降のプロセスにおけるフォトレジストマスク変形抑制への見通しを得た。



(a) 通常の 1step のエッチングの場合



(b) エッチング/Ar プラズマ処理=5/5s×18 回の
マルチステップエッチングの場合

図2. 累計エッチング時間 90s 後の 25nm 幅のフォトレジストマスクの形状。

論文審査結果の要旨

21世紀の様々な社会基盤を構成する機器の性能や信頼性制御のため、電子部品に対する信号伝送と信号処理の高速大容量化と小型・軽量化への要求は増すばかりである。このため、トランジスタの加工精度は数 nm にまで到達しつつあり、この超微細加工技術は、微細パターンを薄膜に転写するリソグラフィー技術と、物理化学的に薄膜を除去するエッチング技術から構成され、フォトレジストと呼ばれる高分子材料が使用されている。しかし、エッチングプロセスでは高分子材料がプラズマ環境にさらされることから、加工損傷に伴う厚さ数 nm 以下の変質層が不均質に形成され、加工後のフォトレジスト膜に残留変形が生じてしまい、設計通りの加工が困難になるという新たな課題が顕在化している。そこで本研究は、次世代の安定したトランジスタ加工を実現することを目的とし、この変質層の形成支配因子を解明するとともに、変質層の物理化学的な性質を定量的に把握しかつ形成を定量的に予測する技術を開発したものである。さらに、変質層の形成を最低限に制御可能な次世代の超微細加工技術を実現する新しいエッチングプロセスを提案し、その有効性を実証している。本論文はこれらの研究成果をまとめたものであり、全編6章からなる。

第1章は緒論であり、本研究の背景、目的および構成を述べている。

第2章では、フォトレジスト材料表面の損傷が主としてプラズマガス中の従来注目されていたイオンや紫外光ではなく、酸素ラジカルあるいはフッ素ラジカル照射による厚さ数 nm 以下の変質層形成により生じるものであることをフォトレジスト材料とエッチング条件の組み合わせを系統的に変化させた実験により明らかにしている。これは工学上有用な知見である。

第3章では、変質層の物理化学的な性質の詳細な分析を行い、変質層中に残留する約 1 GPa にも達する応力により局所残留変形が生じていることを定量的に明らかにしている。特に大口径ウエハの端部や微細周期パターン端部において必然的に生じるラジカル粒子濃度のわずかな相違や、100 nm 以下の周期パターン構造において、数 nm の寸法ゆらぎが生じただけでも局所的な残留変形が生じるメカニズムも明らかにしている。これは工学上極めて重要な知見である。

第4章ではラジカル反応に伴う変質層の形成と、変質層中の高い残留応力に起因したフォトレジスト微細加工構造の変形を定量的に予測する、反応種の拡散と界面反応モデルと有限要素法構造解析モデルを統合した機械化学連成問題解析手法を提案、開発するとともに、その実用性を実証している。これはナノ材料強度信頼性工学における新たな学術基盤を提供するとともに、工学応用上極めて重要な知見である。

第5章では、前章で開発したフォトレジスト微細加工構造の変形予測手法を応用し、ラジカル反応過程で生じるフォトレジストの残留変形を 0.8 nm 以下に制御可能な、従来のエッチングプロセスと変質層除去プロセスをナノメートルオーダーで繰り返すマルチステップエッチング技術を提案し、その有効性、実用性を実験的に実証している。これは次世代電子デバイスの実現可能性を具体的に示す極めて重要な成果である。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、電子デバイスのナノスケール加工プロセスにおけるフォトレジスト材料の表面損傷発生メカニズムの解明とその高精度制御に基づく次世代トランジスタの超微細加工技術の開発について述べたもので、ナノメカニクスおよびナノ材料強度信頼性工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。